

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЗА ОТВОРАМИ В ЗАГЛИБЛЕННЯХ ТРИКУТНОЇ ФОРМИ ТА ОТВОРАМИ В ПОПЕРЕЧНІЙ ТРАНШЕЇ.

С. В. Потапов¹, О. В. Чолкан¹, Н. А. Панченко^{1,2}

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

²Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація

У даній роботі наведені результати комп'ютерного моделювання плівкового охолодження плоскої пластини з подачею вторинного потоку в поверхневі заглиблення трикутної форми та в поперечну траншею. Моделювання проводилися за допомогою комерційного програмного забезпечення ANSYS AIM 19.2. та з відповідними розрахунками для діапазону переметру вдуву від 0,5 до 2,0. Наведена відповідна порівняльна характеристика.

Ключові слова: плівкове охолодження, трикутні заглиблення, траншея, комп'ютерне моделювання

Вступ

Газові турбінні установки широко використовуються в енергетиці. Однак, через високі температури існує проблема цілісності устаткування, в тому числі і лопаток турбіни. Для підтримки їх роботоздатності застосовується внутрішнє та зовнішнє охолодження, а також теплозахисні покриття. Одним із можливих рішень є плівкове охолодження, яке включається в конструкцію лопатки. Плівкове охолодження є одним із основних способів зовнішнього охолодження лопаток.

При дослідженні різних форм отворів великою популярністю користується комп'ютерне моделювання, через великі затрати при створенні експериментальної установки та відносно невеликі розбіжності при створенні моделі. Для оцінки ефективності використовується поняття ефективності охолодження:

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}^*}{T_2^* - T_{\infty}^*} \quad (1)$$

Де T_{∞}^* – повна температура основного потоку, без врахування охолоджувача, T_{aw} – адіабатична температура поверхні, що захищається, T_2^* – повна температура охолоджувача на виході з отворів [1].

Метою роботи є дослідження ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача в поперечну траншею та через поверхневі заглиблення трикутної форми за модельних умов, а також створення порівняльної характеристики.

1. Комп'ютерне моделювання

Числове моделювання плівкового охолодження було виконано з використанням програмного комплексу ANSYS AIM 19.2. Дослідження було проведено

для моделей, які відрізняються тільки формою заглиблень. Решта показників геометрії є ідентичними.

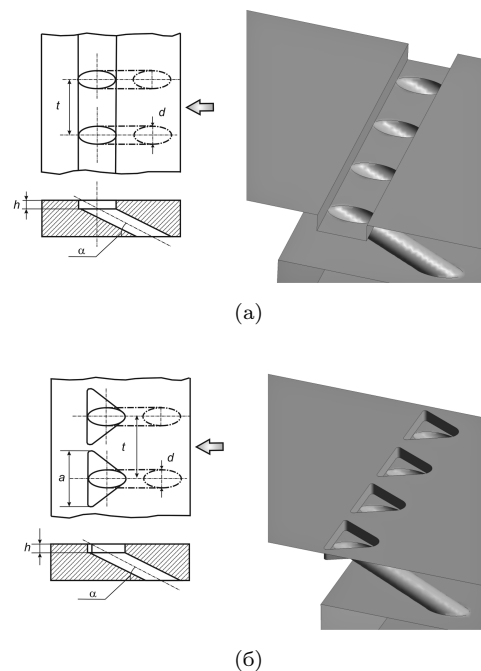


Рис. 1. Досліджені способи плівкового охолодження: а – з отворами в траншейному заглибленні; б – з отворами у трикутних заглибленнях

Геометрична модель, що досліджується, представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму через отвори вдуву. Схеми конфігурацій приведені на (рис. 1а) та (рис. 1б).

Геометричні розміри розрахункової моделі обрані близькими до розмірів характерним для реальних

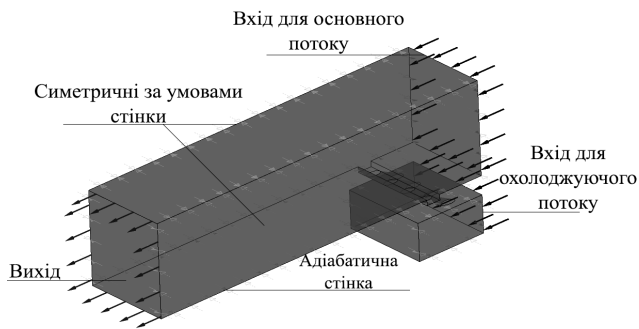


Рис. 2. Геометрія 3D-моделі плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через отвори у траншейному заглибленні

систем плівкового охолодження лопаток газових турбін. Діаметр отвору d складає 0,8 мм, поперечний крок заглиблень $t = 2,4$ мм ($t/d = 3,0$), висота траншеї $h = 0,6$ мм ($h/d = 0,75$), висота заглиблення для трикутних отворів $h = 0,4$ мм ($h/d = 0,5$), кут нахилу отворів до поверхні $\alpha = 30^\circ$.

Досліджувана геометрична 3D-модель плівкового охолодження плоскої поверхні була виконана в модулі *Geometry* пакету *ANSYS* та представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму (пленуму) через отвори вдуву, зображених на рис. 2. Була використана неструктурована комбінована розрахункова сітка, яка була побудована у генераторі *ANSYS Mesh* комбінацією тетраедричних елементів в області основного потоку, з призматичними елементами в областях згущення сітки поблизу твердих стінок, які є обмеженням для каналів розрахункової моделі.

Розмірність розрахункової сітки вибиралася з міркувань забезпечення прийнятної часу розрахунку без істотного збитку для точності одержуваних результатів. Оптимальне число вузлів розрахункової сітки в загальному випадку залежить від розмірів моделі і числа отворів плівкового охолодження і для дослідженої в даній роботі моделі складає 745 тисяч вузлів та 3,5 млн. елементів.

Граничні умови на вході і виході розрахункової області відповідали значенням параметра вдуву близьким до $m = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$.

Швидкість основного потоку становить 37 м/с, температура – 20°C . Температура вторинного потоку – 80°C . Інтенсивність турбулентності прийнята за 1%.

Тверді границі розрахункової області були задані для адабати́чної стінки ($\delta Q = 0$). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії.

Дослідження виконувалися з використанням осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (*RANS*) і для замкнення системи рівнянь використовується *SST* (перенос напруг зсуву Ментера) модель турбулентності, яка дає реалістичні розрахунки в пристіночних областях та в розрахункових областях вдаліні від стінок.

2. Результати та аналіз моделювання

Одним із основних параметрів для характеристики плівкового охолодження виступає ефективність охолодження та параметр вдуву.

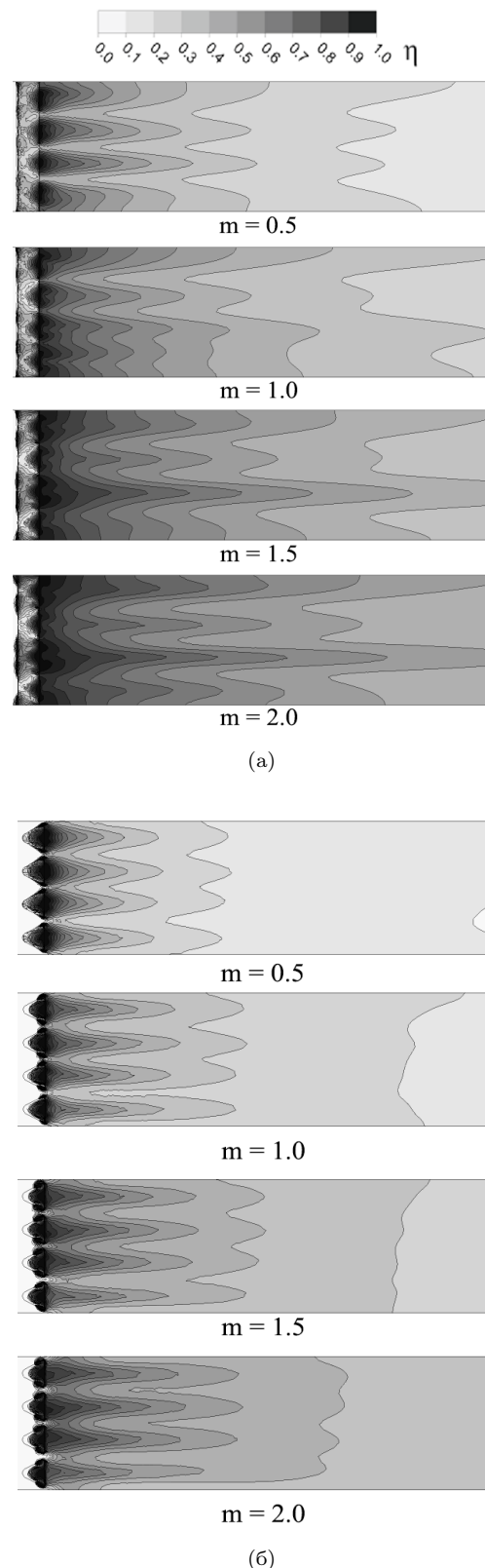


Рис. 3. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 40$: а – за отворами в траншейному заглибленні; б – за отворами у трикутних заглибленнях

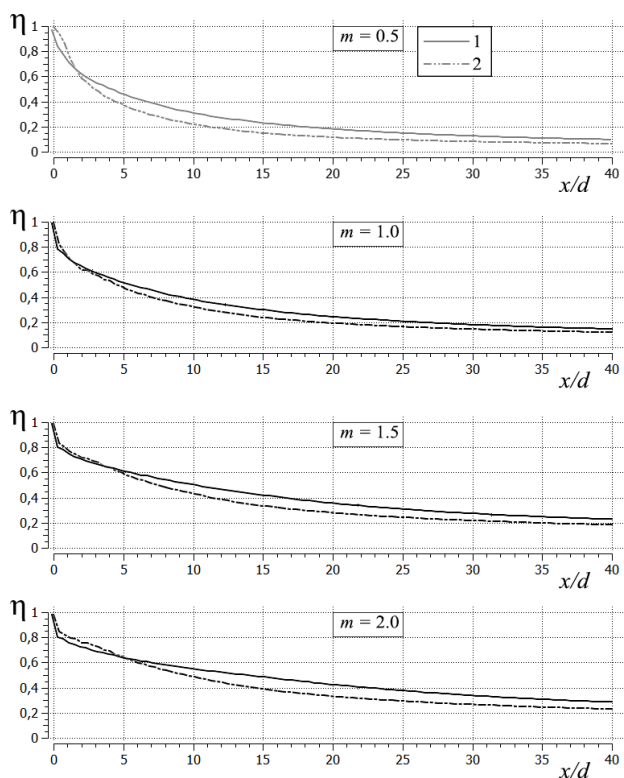


Рис. 4. Ефективність плівкового охолодження при різних параметрах вдува для однорядної конфігурації отворів: 1 – отвори в траншеї; 2 – трикутні отвори

Існує безліч параметрів, здатних вплинути на ефективність плівкового охолодження. Зокрема вплив зовнішньої турбулентності, детальніше з якою можна ознайомитися в [2, 3] та вплив прискорення основного потоку [4]. Однак в даній роботі ці фактори не розглядатимуться.

На рис. 4 наведено осереднені по ширині значення ефективності плівкового охолодження досліджувальних схем. Видно, що ефективність плівкового охолодження схеми з вдувом потоку через отвори в траншеї перевищує ефективність схеми з трикутними отворами. Збільшення ефективності плівкового охолодження за малих значень параметра вдуву спостерігається на початковій та стабілізаційній ділянці ($x/d = 0...20$). Максимальна ефективність спостерігається за мінімального параметра вдуву.

Можна спостерігати поля ефективності досліджуваних схем з вдувом охолоджувача в отвори в траншеї (рис. 3а) та у отвори трикутного заглиблення (рис. 3б) при різних параметрах вдуву $m = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$. Видно, що ефективність плівкового охолодження схеми з вдувом потоку через заглиблення в траншеї перевищує ефективність в трикутних заглибленнях.

Однак, при всіх досліджуваних значеннях параметра вдуву схема плівкового охолодження з подачею вторинного потоку повітря через отвори в трикутних заглибленнях забезпечує більшу рівномірність полів ефективності плівкового охолодження на поверхні охолоджуваної пластини в порівнянні зі схемою отворів в траншеї.

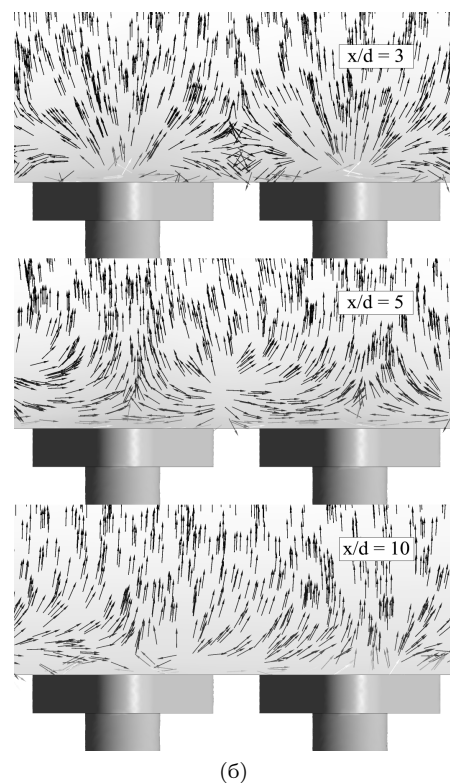
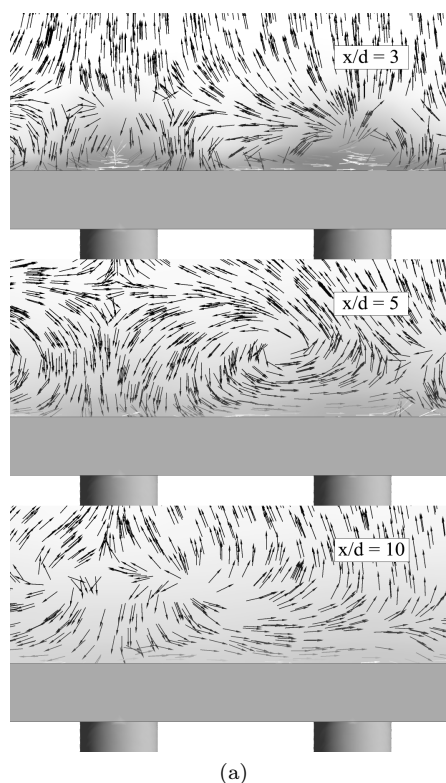


Рис. 5. Вихрова структура у поперечних перерізах при $m = 1,0$ на відстані $x/d = 3; 5; 10$: а – отвори в траншеї; б – трикутні отвори

Для аналізу фізичної структури потоку розглянемо проекції векторів швидкості в поперечних перерізах на відстані $x/d = 3; 5$ та 10 при параметрі вдуву $m = 1,0$ для отворів в траншеї (рис. 5а) та для трикутних заглиблень (рис. 5б).

За траншейними та трикутними отворами спостерігаються невеликі вихорові структури в формі

«ниркового» вихору, які погіршують плівкове охолодження. Про причини появи та методи ліквідації ниркових завихрень можна ознайомитися в [5].

«Нирковий» вихор розвивається за довжиною ділянки (x/d). Схема з вдувом охолоджувача в отвори траншеї забезпечує суттєве зниження інтенсивності масштабу «ниркового» вихору.

Для аналізу фізичної структури потоку за отворами вдуву також розглянемо локальну ефективність плівкового охолодження в поперечному напрямі для різних значень x/d для схеми з вдувом охолоджувача в отвори в траншеї (рис. 6а) і в ряд трикутних отворів (рис. 6б).

На графіках локальної ефективності плівкового охолодження спостерігається велика різниця між траншейними та трикутними отворами. В останніх особливо чітко прослідковуються піки ефективності, що означає нерівномірне покриття поверхні охолоджувачем. Для отворів у траншеї схема показує кращі результати, ніж вдув через ряд трикутних заглиблень.

Висновки

Було виконано порівняльне теоретичне дослідження ефективності плівкового охолодження та фізичної структури потоку за двома перспективними схемами плівкового охолодження з подачею охолоджувача через отвори в траншеї та отвори в трикутних заглибленнях. Досліджені схеми з подачею охолоджувача становлять практичний інтерес при побудові газотурбінної установки. Було виконане порівняльне теоретичне дослідження ефективності плівкового охолодження.

З розглянутих схем плівкового охолодження найбільша ефективність охолодження спостерігається за схемою з подачею охолоджувача в отвори в поперечній траншеї. Частково такий результат зумовлений зниженням інтенсивності вторинних вихрових структур (так званих «ниркових» вихорів). Також зменшується відрив струменя від поверхні, що обумовлює зріст рівномірності поширення плівки. І хоча при охолодженні через отвори в трикутних заглибленнях ефективність нижча, конфігурація залишається актуальною з технічних причин. Відсутність суцільного розриву забезпечує стійку конструкцію лопатки, відповідно, більший термін експлуатації.

В подальшому будуть проведені дослідження, які спрямовані на вивчення фактору неізотермічності.

Перелік використаних джерел

1. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : монография / А. А. Халатов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Б. Резник. – Киев : НТУУ «КПІ», Изд-во «Политехника», 2016. – Т.10 : Перспективные схемы пленочного охлаждения. – 238 с.
2. Bons J.P. The effect of high freestream turbulence on film cooling effectiveness [Electronic resource] / J.P. Bons, C.D. MacArthur, R.B. Rivir // Proceedings of ASME Turbo Expo-1994. – 94-GT-51. – 8p. – 1 CD-ROM. – Title from the screen.

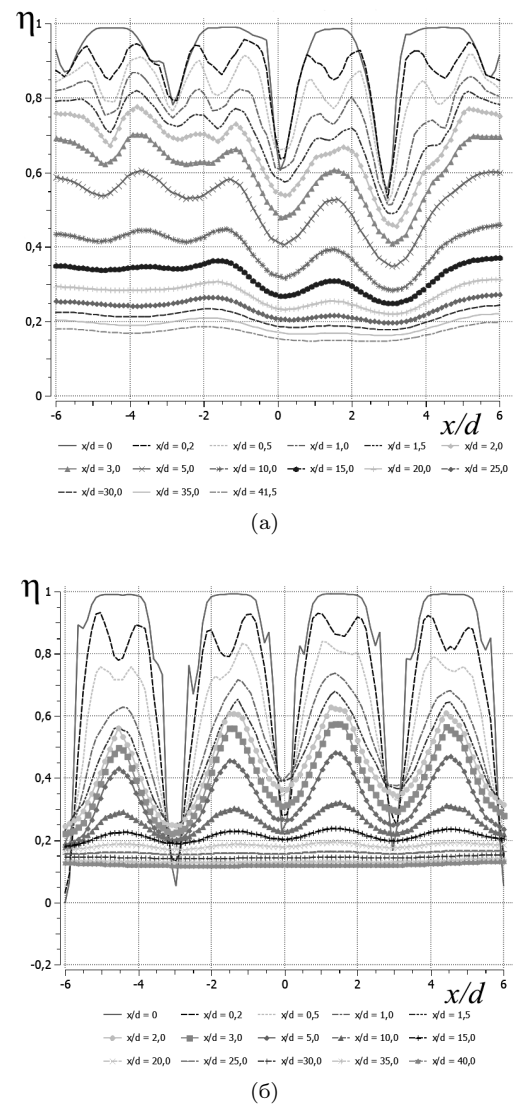


Рис. 6. Локальна ефективність плівкового охолодження при $m = 1$: а – за отворами в траншейному заглибленні; б – за отворами у трикутних заглибленнях

3. Mayhew J.E. The effect of freestream turbulence on film cooling adiabatic effectiveness [Electronic resource] / J.E. Mayhew, J.W. Baughn, A.R. Byerley // Proceedings of ASME Turbo Expo-2002.- GT-2002-30172. – 10p. – 1 CD-ROM. – Title from the screen.
4. Coletti F. Three-dimensional velocity measurements of film cooling flow under favorable pressure gradient [Electronic resource] // F. Coletti, C.J. Elkins, J.K. Eaton // Proceedings of ASME Turbo Expo-2012.- GT2012-69402. – 12p. – 1 CD-ROM. – Title from the screen.
5. Kusterer K. Influence of blowing ratio on the double-jet ejection of cooling air [Electronic resource] / K. Kusterer, D. Bohn, T. Sugimoto, R. Tanaka // Proceedings of ASME Turbo Expo-2007. – GT2007-27301. – 11p. – CD-ROM. – Title from the screen.